

SYNTHESE / EXTENDED ABSTRACT
FRANÇAIS / ENGLISH

**TRANSPORT LONGUE DISTANCE ET STOCKAGE
D'ENERGIE CALORIFIQUE, EN COUPLAGE AVEC DES
PROCEDES DE VALORISATION ENERGETIQUE DES DECHETS
ETAT DE L'ART**

**TRANSPORTATION OVER LONG DISTANCE AND THERMAL
ENERGY STORAGE, COUPLING WITH ENERGETIC
VALUATION PROCESSES FROM WASTE
STATE OF ART**

décembre 2011

O. MEGRET, L. BEQUET - CADET International
A. MANIFICAT, C. WEBER - GRETh



Créée en 1989 à l'initiative du Ministère en charge de l'Environnement, l'association RECORD – REseau COopératif de Recherche sur les Déchets – est le fruit d'une triple coopération entre industriels, pouvoirs publics et chercheurs. L'objectif principal de RECORD est le financement et la réalisation d'études et de recherches dans le domaine des déchets et des pollutions industrielles. Les membres de ce réseau (groupes industriels et organismes publics) définissent collégalement des programmes d'études et de recherche adaptés à leurs besoins. Ces programmes sont ensuite confiés à des laboratoires publics ou privés.

- ✓ En Bibliographie, le document dont est issue cette synthèse sera cité sous la référence :
RECORD, Transport longue distance et stockage d'énergie calorifique, en couplage avec des procédés de valorisation énergétique des déchets. Etat de l'art, 2011, 437 p, n°09-0232/1A
- ✓ Ces travaux ont reçu le soutien de l'ADEME (Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie)
www.ademe.fr

RESUME

L'objet de cette étude est de réaliser un état de l'art sur le transport longue distance et le stockage d'énergie calorifique et d'en étudier le couplage avec les procédés de valorisation énergétique des déchets.

Après un rappel du contexte favorable au développement de ces solutions et à la définition de la portée de ce travail, l'étude débute par un chapitre sur les éléments introductifs en matière de stockage et de transport d'énergie calorifique.

Le second chapitre concerne la description des matériaux, des équipements et des systèmes permettant le stockage d'énergie calorifique.

Le troisième chapitre détaille les systèmes de transport d'énergie calorifique sur longue distance.

Le quatrième chapitre présente les procédés de valorisation énergétique des déchets ainsi que des utilisateurs potentiels d'énergie calorifique.

Le cinquième chapitre résume les différentes techniques de stockage et de transport d'énergie calorifique applicables au domaine des déchets par secteur.

Enfin, le sixième chapitre présente 3 études de cas dans 3 secteurs identifiés : habitat/tertiaire, blanchisserie et industrie haute température (sidérurgie). Le but étant de statuer sur la faisabilité de mise en œuvre des différentes techniques de stockage et de transport d'énergie calorifique dans le domaine des déchets.

MOTS CLES

Valorisation énergétique des déchets, stockage d'énergie calorifique, transport longue distance

SUMMARY

This study aims, on one hand, to achieve a state of art about over long distance transport and heat energy storage and, on the other hand, to study the coupling with waste valuation systems for energy recovery.

After reminding the adequate context of development with these solutions and define the scope of the current work, follow introductive elements about storage and heat energy transport.

In the second chapter we describe several materials, equipments and systems suitable for heat storage energy.

The third chapter is a detail revue of systems for long distance heat energy transport.

The next chapter, the fourth describes valuation techniques and heat energy potentials users.

In the fifth chapter we sum up some of technical solutions for storage and heat transport suitable for waste from various sector.

Finally for the sixth chapter we approach three caseworks in the three following fields: housing/building, industrial laundry and high temperature industry (steel industry). The purpose is to identify the implementation feasibility of the different techniques of storage and waste heat transport.

KEY WORDS

Waste heat recovery, thermal energy storage, over long distance transportation

CONTEXTE

La consommation d'énergie n'a de cesse d'augmenter et les ressources primaires actuelles ne satisferont pas la demande des prochaines générations. Le recours aux énergies renouvelables et leur déploiement en substitution de cet appauvrissement de ressource doivent répondre à notre demande énergétique.

La valorisation énergétique à partir des déchets et de la biomasse fait partie des voies en matières d'énergies alternatives. Que ce soit par décomposition biochimique ou par destruction thermique, l'énergie brute libérée est disponible sous plusieurs formes (gazeuse ou liquide) et doit suivant les modes de consommation être transformée sous forme chaleur ou en électricité.

De plus, les consommateurs de ces énergies ne sont pas nécessairement à proximité des lieux de leur production. Il est ainsi nécessaire de transporter l'énergie sur des distances pouvant être relativement longues. Selon la forme de l'énergie, les conditions techniques et économiques de son stockage et de son transport influenceront la faisabilité et la rentabilité.

Ajoutons à cela que la demande énergétique est fluctuante, saisonnière, non constante avec des « pics » et des « creux » de consommation. Il est alors intéressant de stocker l'énergie pour une utilisation différée, voire pour profiter d'une meilleure tarification d'achat de l'énergie, véritable outil de gestion énergétique. Indiquons que le stockage peut avoir lieu sur le site de production ou sur le site d'utilisation et ce avec diverses implications techniques.

Le stockage d'énergie et le transport longue distance sont donc deux domaines tout à fait inséparables pour le développement des procédés de valorisation énergétique des déchets.

En effet, que ce soit pour contrôler les flux des énergies renouvelables intermittentes ou pour récupérer la chaleur contenue dans les rejets industriels, le stockage de l'énergie constitue une étape technologique critique pour réduire la consommation de carburants fossiles mais aussi pour la valorisation énergétique des rejets industriels comme les déchets et la biomasse qui représentent une grande part d'énergie perdue dans notre société. Une piste prometteuse consiste à stocker l'énergie sous forme de chaleur, pour la restituer ensuite en fonction des besoins. Le stockage d'énergie est donc primordial dans l'utilisation des sources d'énergies intermittentes (solaire, éolien) et l'énergie thermique n'échappe pas à cette nécessité. Il est maintenant admis que le stockage doit avoir un impact important dans l'optimisation du couplage entre la production d'énergie et son utilisation, notamment par la minimisation de la taille des systèmes de conversion et leur fonctionnement au régime nominal, donc au meilleur rendement.

Enfin, dans le domaine de la valorisation énergétique des déchets, le transport sur de longues distances doit s'imposer comme la solution pour connecter les unités de valorisation énergétiques (UVE) à des utilisations dans des réseaux de chauffage urbain. Compte tenu des énergies mises en jeu, ce point est de la plus haute importance dans le cas des centrales UVE mais aussi des centrales électrogènes. Or, la chaleur, mais également le froid, sont des vecteurs énergétiques qui ne se transportent pas actuellement avec une efficacité suffisante sur des distances supérieures à quelques dizaines de kilomètres. Plusieurs techniques sont connues ou mises en pratique avec des degrés divers de performances comme le transport par réseau de vapeur ou d'eau chaude surchauffée. Mais il est clair que des progrès peuvent être réalisés.

OBJECTIF ET PLAN DE L'ETUDE

L'objectif de cette étude est de réaliser un état de l'art des procédés et technologies disponibles ou en développement en matière de stockage et de transport d'énergie calorifique (chaud/froid), toujours en lien avec des procédés de valorisation énergétiques des déchets.

La première phase de l'étude consiste à réaliser un inventaire des matériaux et technologies de stockage thermique (commercialisés ou non) et de leurs mises en œuvre.

En ce qui concerne le stockage thermique, de nombreuses technologies ont été étudiées et certaines développées à un stade industriel. La diversité des solutions tient tout autant aux principes de stockage, aux matériaux retenus, aux capacités thermiques exigées, aux profils de charge et d'usage qu'à l'acceptabilité des coûts. Les principes de stockage de l'énergie thermique sont au nombre de trois. Il s'agit du stockage par **chaleur sensible**, du stockage par **chaleur latente** et du stockage **thermochimique/thermophysique**.

Pour permettre une description et une évaluation des différentes technologies de stockage thermique, nous avons donc réalisé 7 cahiers permettant d'identifier les différentes technologies et matériaux de stockage, ainsi que leurs mises en œuvre :

- Cahier 1 : les techniques de stockage par chaleur sensible longue durée (saisonnier/inter-saisonnier) et basse température
- Cahier 2 : les techniques de stockage par chaleur sensible sous phase liquide à haute température
- Cahier 3 : les techniques de stockage par chaleur sensible sous phase solide à haute température
- Cahier 4 : les techniques de stockage par chaleur latente et leur mise en œuvre pour les applications à basse et moyenne température ($T < 100^{\circ}\text{C}$)
- Cahier 5 : les techniques de stockage par chaleur latente et leur mise en œuvre pour les applications à haute température ($T > 100^{\circ}\text{C}$)
- Cahier 6 : les milieux diphasiques solide-liquide pour le stockage et le transport de chaleur
- Cahier 7 : les matériaux de stockage par procédés thermochimique et thermophysique et leur mise en œuvre

Dans un second temps, un inventaire des processus de transport longue distance à l'état de prototype industriel ou non a été dressé :

- transport d'énergie à haute température
- transport d'énergie à basse température ($< 200^{\circ}\text{C}$)

Après avoir fait référence à différents systèmes en matière de transport sur des longues distances et de stockage d'énergie calorifique, un inventaire des procédés de valorisation énergétique des déchets ainsi que des utilisateurs potentiels d'énergie calorifique a été dressé. Pour les procédés de valorisation énergétique des déchets, il s'agit essentiellement des suivants :

- Unités de Valorisation Energétique UVE (Usine d'incinération d'ordures ménagères)
- méthanisation et valorisation du biogaz d'ISDND (Installation de Stockage de Déchets Non Dangereux)

Les niveaux de production de la chaleur et de son utilisation étant connus, un classement par secteur d'activité des utilisateurs d'énergie calorifique et par principe de stockage, ainsi qu'une confrontation sur l'applicabilité des solutions de stockage et de transport selon les principes non conventionnels au domaine des déchets ont été réalisés.

Pour cela, 3 études de cas par secteur identifiés ont été faites, ceux sont :

- Secteur de l'Habitat/Tertiaire
- Secteur de l'Industrie Basse Température (Blanchisserie, IAA (Industrie Agro-Alimentaire),...)
- Secteur de l'Industrie Haute Température (Sidérurgie)

Ces études de cas ont permis de statuer sur les processus/technologies applicables au domaine des déchets.

Elles ont été menées sous forme de fiches documentées regroupant les informations suivantes :

- secteur concerné
- caractérisation de l'usage - applications visées (production de chaud et/ou production de froid)
- identification des technologies de stockage chaud et/ou froid
- caractérisation de la source de chaleur
- identification des technologies de transport
- prise en compte des aspects environnementaux et économiques

Principaux résultat et Conclusion

Cette étude avait pour objet la réalisation d'un état de l'art sur le transport longue distance et le stockage d'énergie calorifique puis d'en étudier le couplage avec les procédés de valorisation énergétique des déchets.

En France, dans le domaine des déchets et de leur valorisation énergétique, il existe actuellement trois principaux procédés qui sont: **incinération, méthanisation et valorisation du biogaz d'ISDND**. Ces unités sont souvent éloignées des sites de forte consommation d'énergie calorifique (habitat, tertiaire) et en particulier pour les nouvelles auxquelles on a appliqué le concept NIMBY (Not In My Back Yard), et qui présentent un potentiel de livraison d'énergie calorifique important.

Il s'agit de véritable source de production d'énergie sous-exploitée à cause de cette notion de distance.

Tout au long de cette étude, nous avons amené le lecteur à prendre connaissance des technologies existantes en matière de stockage d'énergie calorifique et des processus de transport associés.

Nous avons vu qu'il existe 3 modes de stockage d'énergie thermique qui sont dits : sensible, latent et thermochimique/thermophysique.

Parmi les technologies de stockage sensible, on retrouve **le stockage saisonnier**. Nous avons montré dans le cadre de cette étude que ce mode de stockage n'était pas pertinent compte tenu de la production continue des UVE, de leur niveau de température de production, de l'envergure de l'étude d'avant projet puis du lourd investissement matériel et structurel que cela nécessite.

Le stockage saisonnier a donc été pour ces raisons écarté d'une possible applicabilité dans le domaine des déchets.

S'agissant des technologies de **stockage par chaleur sensible sous phase liquide**, quelques unes ont été étudiées et développées pour la gamme de température qui nous intéresse dans cette étude (100 - 250°C). Il s'agit de :

- La technologie des réservoirs à sels fondus : cette technologie mature est envisageable pour des niveaux de températures assez élevés par rapport à leur point de solidification ($T > 150^{\circ}\text{C}$).
- L'utilisation de l'eau sous pression : c'est une technologie fiable dotée d'une réelle maturité
- L'utilisation d'huiles thermiques : se place comme une technologie plus abordable techniquement dans ce domaine de température que celle de l'eau pressurisée.

Dans cette même gamme de température 100 - 250°C, il existe peu de technologies de **stockage par chaleur sensible sous forme solide** néanmoins le stockage thermique par chaleur sensible sous forme solide avec des bétons haute température ou des céramiques dite techniques reste prometteur notamment par le ratio performance/prix de conception et d'exploitation. C'est le cas du prototype développé par le DLR. (cf. Annexe 3 pour plus d'informations).

Puis, en identifiant les différents MCP (Matériaux à Changement de Phase) et leurs différentes mise en œuvre, nous avons constaté que quelques MCP commercialisés rentrent dans la gamme des températures visées par cette étude ($> 100^{\circ}\text{C}$).

L'étude montre que le **stockage thermique par chaleur latente**, par le biais de matériaux à changement de phase, est technologiquement intéressant du point de vue de la quantité d'énergie stockée et des performances thermiques atteignables. Néanmoins, pour les gammes de haute température (100°C - 400°C), les applications industrielles sont quasi inexistantes et restent au stade de pilotes de recherche (prototype). En effet, pour des températures supérieures à 100°C, les MCP sont difficiles à mettre en œuvre en ce qui concerne les technologies de confinement (encapsulation), la maîtrise des transferts de chaleur (flux soutirable), leur faible durée de vie et conservent un prix unitaire trop important.

Dans le cadre de ces MCP, seules des solutions pour des applications à basse température (et donc souvent liées à la thermique du bâtiment) présente une bonne maturité. On notera néanmoins les projets de recherche prometteurs du DLR mais qui sont encore au stade d'essai. (cf. Annexe 4 pour plus d'informations).

Le **stockage par sorption ou thermochimie** quant à lui accepte une gamme de température de source plus large (100 - 1000°C). Les travaux portant sur ces méthodes de stockage se sont développés depuis plusieurs années, mais à ce jour, ils n'ont pas aboutis à des démonstrateurs industriels. Les difficultés qui expliquent ce manque de résultats concrets viennent du choix de matériaux d'enceinte inadaptés, de la conception des réacteurs et du coût des dispositifs complets.

Il est donc prématuré d'envisager ces solutions dans des démonstrateurs industriels de taille significative.

Aux fins de valider la faisabilité de la mise en œuvre des technologies de stockage d'énergie dans le domaine des déchets, nous avons réalisé sur la base d'une méthodologie, 3 études de cas à partir de la production d'énergie produite par une UVE (incinérateur).

Préalablement, le lecteur trouve dans le rapport complet toutes les technologies de stockage triées par secteur d'usage (habitat, Industrie BT et HT) et par technologies de stockage (sensible, latent, thermochimique/thermophysique), toutes applicables au domaine des déchets.

Tout comme les technologies de stockage d'énergie calorifique, les technologies de transport d'énergie calorifique par secteur sont identifiées et classées.

Ce travail nous permet de conclure ci-après.

Les **réactions catalytiques réversibles** admettent des températures de source de chaleur comprise entre 150 et 1000°C. Dans le domaine des déchets, la technologie qui semble la plus intéressante est la synthèse et la décomposition du méthanol. Des travaux de recherche à l'échelle de laboratoire ont déjà servi de tests au Japon sur des distances supérieures à 20 km pour des applications en chauffage dans les secteurs du bâtiment résidentiel et tertiaire.

Les **systèmes à sorption** quant à eux limitent davantage le niveau thermique et il serait incongru de statuer sur ces techniques.

S'agissant des systèmes batch utilisant des réactions chimiques et des MCP, la bibliographie est plus importante portant entre autres sur des pilotes de laboratoire et industriels. D'un point de vue des caractéristiques physiques notamment en quantité d'énergie transportée et en réduction d'émission de gaz à effet de serre, l'utilisation des MCP est très intéressante.

De nombreux verrous existent en particulier dans l'accès à l'information pour les technologies de stockage et de transport d'énergie calorifique. Nous pouvons néanmoins dire qu'une orientation sur cet axe permettrait entre autres :

- d'améliorer l'efficacité énergétique en élargissant le champ des utilisateurs d'énergie non valorisée produite par les installations de traitement des déchets,
- de réduire les émissions de gaz à effet de serre
- de répondre à la demande du bâtiment qui ne cesse d'augmenter et à l'industrie qui recherche des sources énergétiques instantanées autres que les énergies fossiles.

Dans un souci de faciliter la compréhension pour le lecteur et dans l'optique d'une aide à la décision, nous avons réalisé des études de cas sur 3 secteurs qui sont l'habitat/tertiaire, blanchisserie (industrie BT) et sidérurgie (Industrie HT).

En effet, en France, en 2009, les consommations d'énergie finale dans le bâtiment et dans l'industrie étaient respectivement de 44% et de 22%.

Les études de cas montrent un réel potentiel de réalisation à court terme de solution innovante dans le domaine de l'Habitat et du Tertiaire, qui est le secteur le plus énergivore en France. De par la demande en froid toujours plus grande dans le domaine du tertiaire et maintenant de l'habitat résidentiel, des solutions de valorisation de chaleur par la production de froid a été envisagée et étudiée lors de ces études de cas.

En ce qui concerne le domaine de l'industrie « basse température », de nombreuses solutions existent dans cette plage de température. Néanmoins, les technologies de stockages admissibles et envisageables à court termes restent des solutions dites classiques et matures. On notera tout de même une valorisation de la chaleur par la production de froid, qui est aussi en forte demande par exemple dans l'industrie agro-alimentaire.

Enfin, l'étude de cas appliqué au domaine de l'industrie « haute température » (sidérurgie) a clairement mis en avant des problèmes quand à l'utilisation de stockage thermique à haute température et conclue donc sur un faible potentiel de réalisation à court terme.

Nous noterons aussi que toutes les solutions étudiées lors de ces études de cas ont mis avant une réduction significative des émissions de CO₂.

Cette étude met en avant la faisabilité de mise en œuvre de ces techniques dans le monde de la valorisation énergétique des déchets. Dans le contexte politique, économique et environnemental actuelle et dans une société de consommation avec des besoins énergétique toujours plus grand, on peut espérer que les actuelles incitations fiscales et réglementaires des gouvernements permettront au Maître d'Ouvrage public, aux opérateurs et aux bureaux d'études d'imaginer ce type de solution dans les phases de conception ou d'optimisation des projets futurs.

CONTEXT:

Energy consumption is steadily increasing and the limited primary resources will prevent to meet the need of future generations. Efficient use of energy (Energy Efficiency) and a wide development of renewable and alternative energy faced with the fossil resources depletion are probably the major challenges for this 21st century with the management of world freshwater.

Energy recovery from waste and biomass is one of the paths in alternative energy. Whether through biochemical decomposition or thermal destruction, rough energy is released as gas or liquid and based on the use converted as heat or electricity.

Generally, consumers of these energies aren't close such places of production. So energy have to be transported over long distances. According to the energy form, technical and economic conditions of its storage and transport will influence the feasibility and profitability.

Furthermore, energy demand is fluctuating, seasonal, unsteady with peaks and slack period consumption. The right strategy for a delayed use is to store energy, leaving so the possibility to choice the better price period of energy acquisition, that is a real tool for energy management. With various technical implications storage may take place on the production site or on the site of use.

Energy storage and over long distance transport, almost inseparable have to be used together to develop energy recovery processes from waste.

Both to control the flow of intermittent renewable energy or to recover heat contained in industrial waste, the energy storage technology is a critical step for developing industrial waste energy recovery sector including waste and biomass that's represent a large share of energy lost in our society. We have done it in order to reduce consumption of fossil fuels. A promising way consist to store energy as heat and restore it depending on the needs. The usage of energy storage is therefore essential for developing and using intermittent energy sources (solar power, wind power) and thermal energy cannot be out off this strategy.

In that sector today most people admit that storage will have a significant impact to optimize energy production and the use, as well as minimizing the size of conversion systems in order to approach their nominal speed operation and so reaching the best performance.

Finally, in the field of energy recovery from waste, transportation over long distances must be proposed as the most convenient solution to connect the Energy Valuation Units (EVU) with end users of district heating systems. Given the energy involved, this is the utmost important point for EVU power plants and too power generators.

However, heat and cold are not currently transported with satisfying efficiency over distances greater than about ten kilometers. Several techniques are known and put into practice with various level of performance such as the energy delivery through network of steam or water overheated. But now it is obvious that progress can be made.

OBJECTIVES AND PLAN OF STUDY:

The aim of this study is to achieve a state of the art about processes and technologies available or in development in the field of storage and transport of heat energy (hot / cold), especially those in relation with the energy recovery processes from waste.

Inside the first phase of the study you will find an inventory of materials and technologies for thermal energy storage (marketed or not) and their implementation.

In the same way, for thermal storage, many technologies have been studied and developed until industrial level. The diversity of solutions is as much due to the choice of the principles of storage, selected materials, thermal capacity required, load and use profiles than due to the acceptable costs. Three principles of thermal energy storage are proposed: **the sensible heat** storage, **latent heat** storage and **thermo-chemical/thermo-physical** heat storage.

To allow a description and evaluate the various thermal storage technologies, we have decided to realize seven workbooks in which we identify the different technologies and storage materials, and their implementation:

- Workbook 1: Technical for Long-term sensible heat storage at low temperature (seasonal / inter-seasonal)
- Workbook 2: Technical for sensible heat storage in liquid phase at high temperature
- Workbook 3: Technical for sensible heat storage in solid phase at high temperature
- Workbook 4: Technical for latent heat storage and their implementation for applications at low and medium temperature ($T < 100\text{ °C}$)
- Workbook 5: Technical for latent heat storage and their implementation for high temperature applications ($T > 100\text{ °C}$)
- Workbook 6: Biphasic media liquid-solid for heat storage and heat transport
- Workbook 7: Thermo-chemical storage materials and thermo-physical processes and their implementation

In a second step, an inventory of processes for long-distance transportation at prototype industrial state (or not) was drawn up for:

- Energy transportation at high temperature
- Energy transportation at low temperatures ($< 200\text{ °C}$)

After referring the different systems for transportation over long distances and thermal energy storage, an inventory of energy recovery processes from waste and potential users of heat energy was drawn up. For energy recovery from waste, they are essentially:

- Energy recovery of the incineration plant for household waste
- Anaerobic digestion (methanization) and utilization of discharge gas

Knowing the levels of heat production and their usage, a classification has been made as follows : by sector of activity of the heat energy users and by too the principles of storage all confronted on the applicability solutions for storage and on transport according to the non-conventional principles of waste.

This, has been done for three case studies identified under :

- Field of the Housing / Tertiary
- Field of the Low Temperature Industry (Laundry, IAA (Food Industry)...)...
- Field of High Temperature Industry (Steel Industry)

These ones enabled us to distinguish the processes and technologies appropriate to the waste field.

They were structured with model of documented sheets grouping the following information:

- Concerned field
- Characterization of usage (targeted applications (production of heat and/or cold))
- Identification of hot and/or cold storage technologies and/or cold
- Characterization of the heat source
- Identification of transport technologies
- Taken into account environmental and economic aspects

MAIN RESULTS AND CONCLUSIONS:

The aim of this study was to realize a state of the art of long distance transport and storage of heat energy and to study the coupling with energy recovery from waste.

In the field of waste in France, there are currently three main processes of energy recovery from waste: **incineration, methanization and discharge gas recovery**. Most of time these units are located far from the area of wide heat energy consumption (housing, tertiary) however, they represent a high potential and therefore a significant offer of heat energy particularly those whose construction has been made from the emergence of the NIMBY phenomenon (Not In My Back Yard).

However, it is a real source of power operated poorly due to the problem of distance.

Throughout this study, we invite the reader to take note of existing technologies for energy storage and transport processes associated with heat.

We have indicated three modes of thermal energy storage that is to say : sensible heat, latent heat and thermo-chemical / thermo-physical.

Among sensible heat storage technologies, there is the **seasonal storage**. This study provides the elements to say that this mode of storage is not relevant when we consider the continued production of energy recovery unit, their level of production temperature, the size of the preliminary design study and the heavy investment required for equipment and construction.

The seasonal storage has been excluded for a potential choice in the field of waste.

Regarding technologies for sensible heat storage in liquid phase, among them a few have been studied and developed for considered range of temperature in this study (100-250 °C). They are:

- molten salt tanks technology which is now well develop and usable for relatively high temperature levels, limited to their freezing point ($T > 150$ °C).
- Technology of water tanks under pressure is now reliable with real maturity
- The use of thermal oils technology is technically affordable in this temperature range than the pressurized water.

Always in the range of temperature between 100-250 °C, there is only a few technology for thermal energy storage **with solid media** (sensible heat), but projects using an high temperature concrete or technical ceramics give a promising future in terms of design price / performance ratio and operation. This is the case of the prototype developed by DLR (Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt). (See Appendix 3 for more details).

Then, by identifying the different PCM (Phase Change Materials) and their main implementation, we found that some of them are commercialized for a use within the range of temperatures of this study (> 100 °C).

We have mentioned too that the thermal energy storage by latent heat with phase change materials is technologically attractive especially for the quantity energy stored and thermal performance achievable.

However, for high temperature ranges (100 ° C - 400 ° C), industrial applications are practically nonexistent and still today at a stage of research pilot study.

For a use of PCM above temperatures 100 ° C, it is a trouble to implement it and use encapsulation technology because of heat transfer control (flux draw off), low lifetime technology period and a too high price.

In this context only solutions at low temperature applications are available for PCM (and therefore often applied for building thermal efficiency) with a good maturity. Research projects of DLR are promising but still under test. (See Appendix 4 for further details).

The storage by sorption or thermo chemical are offering a wider range for temperature source (100 - 1000 ° C). Some works on these storage methods have been developed since several years, but none has reached the stage of industrial demonstrators. The difficulties explaining the lack of substantial results is mainly due to the choice of suitable enclosure materials, of the reactor design and the cost of complete devices.

It's therefore too early to consider these solutions in a significant size industrial demonstrator.

In the purpose to validate the feasibility to implement energy storage technologies in the field of waste, we have made methodologically three case studies starting from the energy produced by energy valorization unit (incinerator).

Previously, reader will find in the report, all of the storage technologies sorted by sector of use (Building, Low Temperature and High temperature Industry) and by storage technologies principles (sensible, latent, thermo-chemical / thermo-physical), all of them usable in the waste field.

In the same way taken for storage technologies of heat energy, transportation technologies of heat energy by sector have been identified and classified.

This work allows us to write the following conclusions:

- The reversible catalytic reactions admit temperatures of heat source between 150 and 1000 ° C. In the waste field, the most interesting technology seems to be the synthesis and decomposition of methanol. Research work at laboratory has already been tested in Japan with distances not over 20 km, for residential and tertiary heating applications sectors.

- The Sorption systems are more limited in terms of heat source temperature admissibility (60 - 300 ° C) and the literature isn't very dense on these techniques. So in this study we don't adjudicate on these techniques.

- Regarding batch systems using chemical reactions and PCM, the bibliography is more important with existing industrial and laboratory pilots. About physical characteristics, especially in terms of amount of energy transported and too reducing greenhouse gases emission, the use of PCM is very interesting.

Many important locks exist, including access to information simply to have an idea of availability about technologies of storage and transport of heat energy. Nevertheless, we can already say that we have to go in this axis to improve energy efficiency by expanding the field of end users using the energy providing from waste treatment facilities. This will reduce greenhouse gases emission satisfying the growing need of building and industry otherwise than using fossil energy.

To give a hand to the reader and in the context of help decision, we have conducted case studies of three sectors i.e. Building / Tertiary, Low temperature industry (Laundry, IAA) and steel Industry (High Temperature Industry).

Indeed, in France, in 2009, the final energy consumption in buildings and industry is respectively 44% and 22%.

The case studies show a real potential to achieve a short-term innovative solutions in the field of Building and Tertiary, which is the most energy users sector in France. Because of the increasingly growing demand in cold in tertiary sector and now in the building, the heat recovery solutions for cold production has been considered and studied in these case studies.

Regarding the field of the low temperature industry, many solutions does exist in this temperature range. However, eligible and feasible storage technologies, short-term are solutions becoming classical and so mature. We do note that a valuation of the heat production of cold is also in high demand especially in the food industry (IAA).

Finally, case study applied to the field of high temperature industry (steel Industry) has highlighted problems when the use of thermal energy storage at high temperature and so reached a low potential for achieving short-term.

We also note too that all the solutions studied in the case studies have shown a very significant reduction in CO2 emissions.

This study give a overlook on the feasibility of implementing these techniques in the world of energy recovery from waste. In the current political context, economical and environmental, and in our consumer society where the energy need is growing and growing, it's hoped that the current incentives taxes and government regulation will allow at the project engineer, operators and consultants to imagine solutions in the steps of future projects design and optimization.